

FACTORES QUE REGULAN LA DINÁMICA FREÁTICA EN DOS AMBIENTES DE LA PAMPA INTERIOR CON DISTINTOS REGÍMENES DE HUMEDAD

EVA LAURA FLORIO¹; JORGE LUIS MERCAU¹ & MARCELO DANIEL NOSETTO^{1-2*}

Recibido: 27-05-15

Recibido con revisiones: 24-08-15

Aceptado: 30-08-15

RESUMEN

En gran parte de la región pampeana argentina, el acuífero freático ejerce una fuerte influencia, tanto positiva como negativa, sobre los sistemas agropecuarios. Por lo tanto, comprender su dinámica y sus controles es fundamental para predecir cambios de nivel y diseñar estrategias de manejo. En este trabajo, evaluamos la influencia de las características climáticas, la topografía y el tipo de cultivo sobre las fluctuaciones del nivel freático a escala anual y mensual en dos sitios con diferencias edafo-climáticas de la Pampa Interior (Pehuajó, Bs. As. y Mackenna, Córdoba). Para esto, registramos periódicamente la profundidad freática durante cinco campañas agrícolas en 34 freáticos ubicados bajo distintos cultivos (maíz, soja, trigo/soja y cobertura/maíz) y en diferentes posiciones topográficas (bajo, media loma y loma). En ambos sitios encontramos que el clima ejerció un rol preponderante en la dinámica freática, explicando el efecto "año" más del 80% de la suma de cuadrados (SC) tipo 1 ($p < 0,01$). La lluvia anual estuvo relacionada linealmente con el cambio de nivel en ambos sitios ($r^2 = 0,37$ y $0,56$ para Pehuajó y Mackenna, respectivamente). La influencia del cultivo se manifestó a la escala mensual en Pehuajó, mientras que en Mackenna también influyó a la escala anual, explicando el 10% de la SC ($p < 0,01$). En este sitio se encontró una estrecha relación lineal negativa entre el cambio de nivel freático y la evapotranspiración del cultivo ($r^2 = 0,57$), observándose niveles más profundos en sistemas de doble cultivo. La topografía solo afectó la dinámica freática en Mackenna y a la escala mensual, donde se observaron mayores ascensos y descensos en los bajos. Si bien el clima fue el control fundamental de la dinámica freática, la influencia del cultivo en Mackenna a la escala anual abre la posibilidad de cierto "manejo" agropecuario de los niveles de napa. La falta de dicho efecto en Pehuajó sugeriría un rol importante de la evaporación directa en el balance hídrico.

Palabras clave. Napa, balance hídrico, topografía, evapotranspiración.

FACTORS GOVERNING THE GROUNDWATER DYNAMICS IN TWO SITES OF THE INLAND PAMPA WITH DIFFERENT MOISTURE REGIMES

ABSTRACT

In most of the Argentinean Pampas, the water-table strongly affects the agricultural systems both positively and negatively. Thus, it is critical to understand the dynamic and drivers of water-table levels in order to make predictions and to design management strategies. In this work, we evaluated the influence of climatic conditions, topography and crop type on the water-table dynamic, at the annual and monthly scales, at two sites in the Inland Pampa with different edaphic/climatic conditions (Pehuajó, Bs. As. and Mackenna, Córdoba). For this purpose, we registered the water-table depth periodically during five growing seasons, in 34 boreholes located under different crops (corn, soybean, wheat/soybean and cover crop/corn) and in different topographic positions (lowland, mid-slope, highland). We found that in both sites, climate played a major role on the water-table dynamic, being 80% of the sum of squares (SS) type I explained by the "year" effect ($p < 0.01$). Annual rainfall was linearly related to water-table level changes at both sites ($r^2 = 0.37$ and 0.56 for Pehuajó and Mackenna, respectively). Crop influence was observed at the monthly scale in Pehuajó, but in Mackenna it was also evidenced at the annual scale, explaining 10% of the SS type I ($p < 0.01$). At this site, we found a close lineal negative relationship between water-table level changes and crop evapotranspiration ($r^2 = 0.57$), observing deeper water-table levels under double crops. Topography only affected the water-table dynamic in Mackenna and at the monthly scale, when we observed higher water-table rises and drops in lowlands. Although climate was the main driver of the water-table dynamic, crop influence in Mackenna at the annual scale opens the possibility for an agricultural "management" of groundwater levels. The lack of this effect in Pehuajó suggests that soil evaporation may be playing a key role in the hydrological balance.

Key words. Water-table, water balance, topography, evapotranspiration.

¹ Grupo de Estudios Ambientales, IMASL, CONICET & UNSL;

² Facultad de Ciencias Agropecuarias, UNER.

* Autor de contacto: marcelo.nosetto@gmail.com

INTRODUCCIÓN

En gran parte de la región pampeana el acuífero freático se encuentra a escasa profundidad influenciando el funcionamiento de los agro-ecosistemas. Ésta influencia puede ser positiva, por ejemplo cuando el aporte de agua freática a los cultivos ayuda a suplir déficits en las precipitaciones (*i.e.* Florio *et al.*, 2014), o negativa, cuando la escasa profundidad genera anegamiento y anoxia radical (*i.e.* Nosetto *et al.*, 2009) o cuando favorece procesos de salinización (*i.e.* Lavado & Taboada, 1988). Esta fuerte influencia del agua subterránea en estos paisajes determina la necesidad de comprender los mecanismos y controles que rigen las fluctuaciones de nivel tanto de largo como de corto plazo. Esta información es fundamental para predecir cambios posibles de nivel, como así también para diseñar estrategias de manejo sustentables en el tiempo.

Las fluctuaciones del nivel freático son determinadas fundamentalmente por el resultado del balance hídrico, donde balances positivos generan eventos de recarga y ascensos de nivel, y balances negativos se asocian a procesos de descarga y descensos del nivel freático (Freezem & Cherry, 1979). A su vez, los principales controles del balance hídrico son las condiciones climáticas, la topografía, el tipo de vegetación y su manejo agrícola y las obras hidráulicas como por ejemplo el drenaje (Dingman, 1993). En región Pampeana, donde las obras hidráulicas tienen en general un impacto muy localizado (Menéndez *et al.*, 2012), la única vía que tiene el hombre de influenciar la dinámica freática es a través de la elección de cultivos y el manejo que realiza sobre ellos. Ésta posibilidad es utilizada ampliamente en otras regiones del mundo con una problemática similar (*e.g.* Australia, Ward *et al.*, 2002), pero sin embargo la misma es raramente tenida en cuenta por los productores agropecuarios de región pampeana, posiblemente debido a la poca información que existe al respecto.

Dentro de las variables climáticas, la precipitación, determinando el ingreso de agua al sistema, y la evapotranspiración potencial, dictando la máxima salida posible de agua de manera evaporativa, son las de mayor relevancia. Cabe destacar que en región pampeana las salidas líquidas a nivel regional son mínimas debido a la topografía extremadamente plana que la caracteriza (Kuppel *et al.*, 2015). La topografía también juega un rol clave a escala local determinando la distancia desde la superficie del suelo al nivel freático (*i.e.* profundidad freática) y con esto las posibilidades de recarga y descarga freática. En las posiciones topográficas bajas la menor profundidad freática aumenta las

tasas de descarga directa por parte de los cultivos en comparación con lomas (Nosetto *et al.*, 2009), como así también las posibilidades de recarga debido al menor espesor de la zona no saturada (Nosetto *et al.*, 2013). A través de la magnitud y largo de las pendientes, la topografía también ejerce influencia sobre los niveles de escurrimiento superficial y la consecuente redistribución superficial de agua en el paisaje.

El tipo de vegetación y el manejo al que se somete la misma afecta fuertemente la capacidad transpirativa y la profundidad de raíces y con esto las posibilidades de descarga y recarga freática (Kim & Jackson, 2012; Nosetto *et al.*, 2015). Los contrastes más evidentes se observan al comparar vegetación herbácea con forestaciones, dado que las últimas generan una notable depresión de los niveles freáticos (Heuperman, 1999). Si bien las forestaciones son promocionadas en región pampeana como una alternativa de regulación hidrológica (Alconada Magliano *et al.*, 2009), por distintas razones, es infrecuente que los productores las implementen en grandes áreas. Algo similar ocurre con las pasturas perennes, que también deprimen significativamente los niveles freáticos (Nosetto *et al.*, 2015), pero sin embargo su superficie muestra un notorio retroceso en las últimas décadas en la región, siendo reemplazadas por cultivos anuales, principalmente soja. En dicho escenario resulta importante conocer si los distintos cultivos anuales y las variaciones en su manejo, influyen sobre la dinámica freática. Por ejemplo, resulta interesante analizar el efecto sobre los niveles freáticos de un sistema de doble cultivo (trigo/soja) en comparación con un único cultivo de verano (soja o maíz), teniendo en cuenta que el sistema doble puede tener una evapotranspiración anual de hasta 150 mm superior al cultivo simple (Nosetto *et al.*, 2012).

Si bien trabajos previos han evaluado los diversos factores que regulan la dinámica freática, son más escasos los trabajos que hayan evaluado simultáneamente más de un factor y que hayan comparado su influencia en sitios con distintas características ambientales. El objetivo de este trabajo consistió entonces en evaluar la influencia de las características climáticas, la topografía y el tipo de cultivo sobre las fluctuaciones del nivel freático a dos escalas temporales (anual y mensual) en dos sitios de la Pampa Interior (Mackenna, Córdoba y Pehuajó, Buenos Aires) con regímenes contrastantes de humedad. Para abordar este objetivo, registramos periódicamente la profundidad freática durante cinco campañas agrícolas en 34 freatímetros ubicados bajo distintos cultivos y en diferentes posiciones topográficas.

Mediante análisis de varianza evaluamos el grado de influencia del clima, del cultivo y la topografía sobre las variaciones del nivel freático y mediante análisis de regresión caracterizamos la asociación entre los cambios de nivel y distintas variables climáticas.

MATERIALES Y MÉTODOS

La Pampa Interior posee un relieve regional extremadamente plano (pendiente $< 0,1\%$) y un clima sub-húmedo, lo que determina, conjuntamente con una red de drenaje poco desarrollada, que la napa freática se encuentre a escasa profundidad (Jobbágy *et al.*, 2008). Los dos sitios en los cuales se evaluaron los controles de la dinámica freática están ubicados en las sub-unidades "Plana" y "Occidental" de la Pampa Interior. La sub-unidad Plana posee una pendiente local muy suave y estratos impermeables a cierta profundidad, lo que se traduce en la formación de un sistema con numerosas lagunas. La sub-unidad Occidental presenta un relieve local más ondulado, moldeado por procesos de deflación y acumulación que tuvieron lugar durante paleoclimas áridos (Soriano *et al.*, 1991).

El sitio correspondiente a la sub-unidad Plana se ubica cercano a la localidad de Pehuajó (Buenos Aires, de aquí en más sitio Pehuajó, 36,08 S; 61,70 O), mientras que el ubicado en la sub-unidad Occidental se ubica cercano a la localidad de Vicuña Mackenna (Córdoba, de aquí en más sitio Mackenna, 34,19 S; 64,31 O). En Pehuajó, los suelos se desarrollaron mayoritariamente a partir de sedimentos limosos y arenas finas resultando en Hapludoles típicos y énticos (Tabla 1). En algunos casos es común encontrar superficialmente (< 1 m) el contacto entre dos formaciones diferentes (E1 y E3 según Tricart 1973), dando lugar a un paleo-horizonte B (Hapludoles tapto-argílico o taptonátrico). La textura de los suelos es generalmente franco-arenosa a franca, pero en las partes más bajas del paisaje los suelos presentan un mayor contenido de arcilla y presencia en algunas ocasiones de horizontes nátricos, dando lugar a Natracuoles y Natracualfes. El paisaje es suavemente ondulado y presenta pendientes locales cercanas a $\sim 0,5\%$. En general los suelos presentan buen drenaje debido a la textura gruesa de los mismos sin embargo, en las posiciones topográficas más bajas la presencia de capas impermeables subsuperficiales y la baja pendiente favorecen la formación de lagunas con distintos grados de salinidad. Durante períodos húmedos, los ascensos freáticos favorecen la proliferación de los cuerpos de agua, los cuales pueden llegar a cubrir hasta el 30% del paisaje (Kuppel *et al.*, 2015). El clima es templado sub-húmedo, con una temperatura media anual de $15,2^\circ\text{C}$. La precipitación (Pp) y evapotranspiración potencial (ETP) media anual son de 940 y 1150 mm año^{-1} , respectivamente (1961-1990, New *et al.*, 2002), resultando en un balance negativo de -210 mm año^{-1} (Tabla 1). A nivel mensual, el balance hídrico (Pp-ETP) resulta positivo durante

el otoño (Marzo-Mayo), mitad del invierno (Junio-Julio) y durante el mes de Octubre. En cambio, durante los meses de verano (Diciembre-Febrero), el balance es claramente negativo (-143 mm en el período). Para las campañas evaluadas en este trabajo (2008/09 -2012/13), la Pp media fue de 959 mm año^{-1} y varió entre 683 y 1265 mm año^{-1} . Por otro lado, la ETP varió entre 1256 y 1383 mm año^{-1} , lo que determinó que los balances hídricos (Pp-ETP) fluctuaran entre $+10$ y -664 mm año^{-1} . El manejo agrícola en Pehuajó procura mantener una secuencia de Trigo/Soja-Maíz temprano-Soja.

En Mackenna los suelos predominantes son Haplustoles énticos, areno francos a franco arenosos, bien drenados, con una profundidad > 150 cm y no presentan restricciones significativas para el crecimiento de los cultivos (INTA 1989) (Tabla 1). La fuerte acción eólica favoreció la formación de un paisaje ondulado generado por la sobreimposición de formas medanosas de distinto origen y edad, dando lugar a dunas parabólicas (Degiovanni 2005). Las diferencias de cota promedio entre lomas y bajos oscilan en ~ 3 m. Las pendientes locales son notoriamente mayores que en Pehuajó y cercanas al $1,3\%$ (Tabla 1). El drenaje de los suelos es bueno y muchas paleo-depresiones originadas por deflación se transformaron en lagunas naturales. El clima es templado sub-húmedo, con una temperatura media anual de $16,5^\circ\text{C}$. La precipitación (Pp) y evapotranspiración potencial (ETP) media son de 745 y 1230 mm año^{-1} , respectivamente (1961-1990, New *et al.*, 2002; Magliano *et al.*, 2015), resultando en un balance hídrico claramente (-485 mm año^{-1}) más negativo que Pehuajó (Tabla 1). A nivel mensual, todos los meses también presentan balance negativo, siendo los meses del verano (Diciembre-Febrero) los que acusan el balance más negativo (-202 mm en el período). Para las campañas evaluadas en este trabajo (2007/08- 2001/12), la Pp media fue de 688 mm año^{-1} y varió entre 618 y 769 mm año^{-1} . Por otro lado, la ETP varió entre 1190 y 1551 mm año^{-1} , lo que determinó que los balances hídricos (Pp-ETP) fluctuaran entre -504 y -853 mm año^{-1} . El manejo agrícola en el campo donde se realizaron las mediciones alterna típicamente maíz y soja en una rotación flexible que incluye esporádicamente el doble cultivo trigo/soja. La siembra de maíz se divide en siembras tempranas (Octubre) o siembras tardías (Diciembre) precedidas en este último caso por un cultivo de cobertura (centeno).

Para evaluar la influencia del clima, la topografía y el cultivo sobre la dinámica freática se realizaron mediciones de profundidad freática en freatímetros ubicados a lo largo de toposecuencias (loma, media-loma y bajo) en distintos cultivos durante cinco campañas agrícolas. En Mackenna se evaluó la dinámica freática en 18 freatímetros ubicados en tres lotes cultivados con maíz temprano, cobertura-maíz tardío, soja y trigo/soja. En Pehuajó las mediciones se realizaron en una red de 16 freatímetros distribuidos en seis lotes con cultivos de maíz temprano, soja y doble cultivo trigo-soja. Cabe aclarar que los

Tabla 1. Características edáficas, climáticas, geomorfológicas y de lotes agrícolas en los sitios de Pehuajó y Mackenna.
Table 1. Edaphic, climatic, geomorphological and agricultural plots characteristics at Pehuajó and Mackenna sites.

	Pehuajó	Mackenna
Temperatura media anual (°C)	15,2	16,5
Precipitación media anual (mm año ⁻¹)	940	745
Evapot. Potencial media anual (mm año ⁻¹)	1150	1230
Balance hídrico medio anual (Pp-ETP, mm año ⁻¹)	-210	-485
Meses con Pp>ETP	Marzo-Julio, Oct.	-
Suelos predominantes	Hapludoles típicos y énticos	Haplustoles énticos
Texturas predominantes	franca a franco-arenosa	areno-franca a franco-arenosa
Régimen de humedad	údic	ústico
Conductividad hidráulica saturada (m día ⁻¹)	0,25 - 1,1	1,1 - 3,5
Prof. freática media Bajos (m)	1,53	1,86
Prof. freática media Medias Lomas (m)	2,37	2,40
Prof. freática media Lomas (m)	3,35	3,55
Paisaje	suavemente ondulado	ondulado
Pendiente media local (%)	0,5	1,3
Largo medio pendientes (m)	250	220
Tamaño medio lotes (ha)	150	300
Relación perímetro/superficie lotes (m ha ⁻¹)	84	26

lotes no estuvieron sometidos al mismo cultivo durante las cinco campañas sino que fueron rotando los cultivos según el esquema de rotación propio de cada establecimiento. La frecuencia de medición de la profundidad freática fue variable, pero en promedio se obtuvo aproximadamente una medición mensual. Para todo el período de estudio se registró la precipitación diaria a partir de pluviómetros instalados en los establecimientos. La evapotranspiración de referencia FAO-Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) fue estimada a partir de datos diarios de temperatura, radiación, viento y humedad atmosférica registradas en una estación meteorológica ubicada en el mismo campo, en el caso de Mackenna, y en una estación del Servicio Meteorológico Nacional cercana al campo (Pehuajó, a 29 km) en el caso de Pehuajó.

Los freatímetros se construyeron a partir de tubos de PVC los cuales se introdujeron 0,5-1 m por debajo del nivel freático y se extendieron 0,3-1,5 m por encima del nivel del suelo. Los dos metros inferiores del tubo de PVC fueron ranurados para facilitar la equalización de presiones entre el exterior del tubo y su interior. El extremo superior del tubo se cubrió con una tapa de PVC. Durante el período analizado, las profundidades medias en Pehuajó para lomas, medias-lomas y bajos fueron de 3,3 m, 2,4 m y 1,5 m, respectivamente; y 3,6 m, 2,4 m y 1,8 m en Mackenna (Tabla 1).

Los efectos sobre la dinámica freática se evaluaron a la escala temporal anual desde mayo hasta abril y también en intervalos mensuales. Para analizar la relevancia de cada factor

en la determinación de los cambios de nivel freático se realizaron ANOVA factoriales a partir de los cuales se calculó el porcentaje de contribución de cada factor (año, cultivo, topografía y sus interacciones) a la suma de cuadrados tipo 1. En cuanto al efecto "año", cada campaña evaluada se introdujo en el ANOVA como un nivel del factor. El efecto "cultivo" se analizó de dos maneras diferentes. Por un lado, se lo consideró como una variable cualitativa según el tipo de cultivo en el cual se encontraba cada freatímetro. Por otro lado, para tener una mejor caracterización de la demanda hídrica a la que estaba sometido cada freatímetro, se realizó el cálculo del coeficiente de cultivo (Kc), comúnmente utilizado en la estimación de la evapotranspiración del cultivo (Allen *et al.*, 1998), el cual se introdujo en un Modelo Lineal Generalizado. La estimación del Kc se realizó satelitalmente a nivel de lote cada 16 días utilizando los valores de NDVI derivados del sensor MODIS (Nosetto *et al.*, 2012). Los valores de Kc fueron obtenidos a partir de un escalamiento entre los valores máximos y mínimos de Kc (1,1 y 0,2, respectivamente) sugeridos por FAO (Allen *et al.*, 1998) y los valores máximos y mínimos de NDVI registrados durante el período de análisis. Finalmente, el efecto de la "topografía" se introdujo en el ANOVA como variable cualitativa con tres niveles posibles (loma, media loma y bajo) tanto para Mackenna como para Pehuajó, donde cada freatímetro se clasificó según su posición en el paisaje. Por otro lado, se realizaron regresiones lineales simples entre el cambio de nivel y distintas variables climáticas.

RESULTADOS

La variación del nivel freático a la escala anual (Mayo-Abril) estuvo en ambos sitios principalmente explicada por el efecto "año" (Tabla 2). La variación de las precipitaciones y la ETP representaron las principales diferencias entre años siendo el coeficiente de variación de la ETP anual de 10% y 4% para Mackenna y Pehuajó, respectivamente; y de 8% y 25% para la precipitación. En el caso del balance hídrico (Pp-ETP), el rango de variación (máx-mín) fue notoriamente mayor en Pehuajó (673 mm) respecto a Mackenna (350 mm). Esto se debió fundamentalmente a que la última campaña evaluada en Pehuajó registró un balance positivo debido al alto nivel de precipitaciones (1265 mm/año), siendo el tercer mayor registro desde 1959.

En ambos sitios se encontró una relación lineal entre las variables climáticas y los cambios anuales de nivel freático, siendo estas relaciones más estrechas en el sitio de Mackenna (Fig. 1). Como es esperable, mayores precipitaciones produjeron mayores ascensos freáticos (Figs. 1a y 1b; $p < 0,01$), siendo la precipitación de indiferencia (*i.e.* cuando no hay cambio de nivel) claramente mayor en el sitio más húmedo (*i.e.* Pehuajó, Pp de indif. = 908 mm/año) que en el sitio más seco (Mackenna, Pp de indif. = 707 mm/año). La relación entre cambios de nivel y ETP no fue significativa en Pehuajó, pero sí en Mackenna ($r^2 = 0,12$, $p < 0,01$). Esta asociación mejoró notablemente en Mackenna ($r^2 = 0,57$, $p < 0,01$; Fig. 1d) cuando se utilizó la ETc calculada a partir de los valores de Kc, pero se mantuvo no significativa en Pehuajó (Fig. 1c). La relación de los cambios de nivel con el balance hídrico (Pp-ETc) fue significativa en ambos sitios. En Pehuajó, el coeficiente de correlación encontrado con el balance hídrico fue levemente inferior al encontrado con la lluvia ($r^2 = 0,34$), pero en Mackenna este resultó mejorado ($r^2 = 0,66$). La pendiente de la relación Pp-ETc vs. cambio anual de nivel freático (Fig. 1e y 1f) no mostró diferencias estadísticamente significativas entre ambas localidades (0,23 y 0,19 para Mackenna y Pehuajó, respectivamente, $p = 0,3$). Esto implica que por cada mm de cambio en el balance hídrico, el nivel freático se modifica 0,23 cm en Mackenna y 0,19 cm en Pehuajó. Esta respuesta similar en ambos sitios podría deberse a que el almacenamiento de agua entre Capacidad de Campo y Saturación, estimados a partir de los datos de textura, es similar en los dos sitios estudiados (Sat. - CC. = 0,21 y 0,23 cm^3 agua cm^{-3} suelo para Mackenna y Pehuajó, respectivamente).

A la escala mensual, el efecto año también ejerció fuerte influencia explicando las variaciones de nivel freático. En Pehuajó, el efecto año resultó significativo en todos los

Tabla 2. Significancia de los controles de la dinámica freática sobre los cambios de nivel a la escala anual para los sitios de Pehuajó y Mackenna. Se presentan los resultados (p-valor y % de la suma de cuadrados tipo I) del ANOVA factorial considerando los factores: año, cultivo y topografía. Table 2. Significance of water-table drivers on annual changes in Pehuajó and Mackenna. The results (p-value and % of sum of squares type I) of ANOVA factorial are shown, considering the factors: year, crop and topography.

	Pehuajó		Mackenna	
	p-valor	%SC I	p-valor	%SC I
Año	<0,01	96,4	<0,01	80,3
Cultivo	0,05	0,4	<0,01	9,6
Topografía	0,56	0,1	0,99	0,0
Año x Cultivo	<0,01	1,8	0,08	3,8
Otras interacc.	>0,1	3,2	>0,1	6,3

períodos mensuales, con excepción del período junio-julio (Tabla 3), el cual resultó el más estable de todos los períodos. En Mackenna, el efecto año fue significativo en 7 períodos mensuales, coincidiendo en general los períodos sin significancia con los momentos de menores fluctuaciones freáticas.

Se encontró una notoria diferencia en cuanto al efecto "cultivo" explicando las variaciones de nivel de napa entre ambos sitios de estudio. Tal como lo sugirió la relación entre ETc y cambios de nivel (Fig. 1c y d), el efecto "cultivo" fue sólo marginal en Pehuajó ($p = 0,04$), pero en cambio explicó el 10% de la variabilidad en las fluctuaciones de nivel en Mackenna (Tabla 2). Por otro lado, cuando el efecto "cultivo" se representó a partir de los valores de Kc derivados satelitalmente, el porcentaje de variación explicada se incrementó ligeramente al 11% en Mackenna, mientras que no representó una mejora en Pehuajó.

Las distintas opciones de cultivo presentaron diferencias en la evapotranspiración anual del cultivo (ETc) que no necesariamente se tradujeron en cambios de nivel. En ambos sitios, las máximas ETc correspondieron a los cultivos dobles (980 mm/año para trigo/soja en Pehuajó; 890 mm/año y 937 mm/año para trigo/soja y cobertura/maíz en Mackenna, respectivamente) y la mínima ETc se asoció al cultivo de maíz temprano en Mackenna (725 mm/año) y a la soja de primera en Pehuajó (860 mm/año) (Fig. 2). No obstante estos contrastes en la ETc, no se observó en Pehuajó un efecto sobre la variación anual en los niveles freáticos, registrando todos los cultivos niveles similares al final de la campaña (Fig. 3a). En cambio en Mackenna, los cultivos dobles terminaron la campaña con niveles claramente inferiores (~35 cm) que los cultivos simples (Fig. 3b).

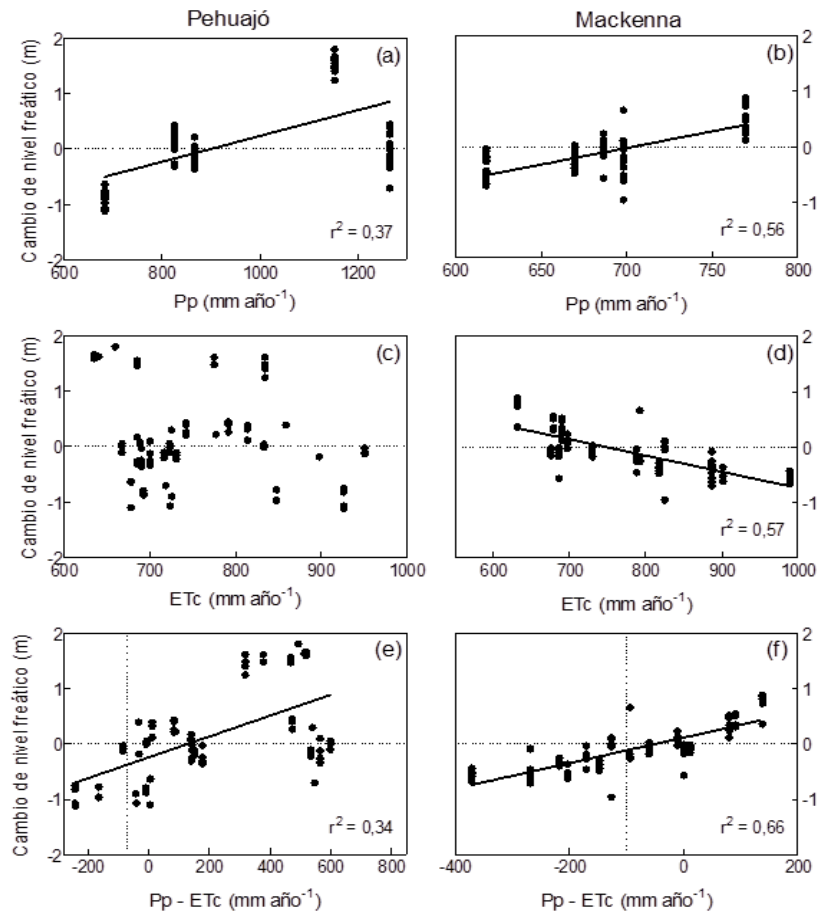


Figura 1. Asociación entre cambios anuales (mayo-abril) de nivel freático y distintas variables climáticas para los sitios de Pehuajó y Mackenna. Se presenta la relación entre los cambios anuales de nivel freático y la precipitación anual (paneles a y b), la evapotranspiración anual del cultivo (paneles c y d) y el balance hídrico anual (Pp- ETc, paneles e y f). Se ajustaron modelos de regresión lineal y se indica el r^2 en los casos en que es significativo ($p < 0,01$).

Figure 1. Association between annual changes (may-abril) in water-table level and different climatic variables in Pehuajó and Mackenna. The relationships between annual water-table level changes and annual rainfall (panels a and b), annual crop evapotranspiration (panels c and d) and annual water balance (Pp-ETc, panels e and f) are shown. Linear regression models were adjusted and the r^2 value is indicated when it is significant ($p < 0,01$).

Tabla 3. Significancia de los controles de la dinámica freática sobre los cambios de nivel a la escala mensual para los sitios de Pehuajó y Mackenna. Cuando el modelo o un factor son significativos se indica con un * ($p < 0,1$) o con ** ($p < 0,05$), y cuando no lo son con ns.

Table 3. Significance of water-table drivers on monthly changes in Pehuajó and Mackenna. If the model or a factor is statistically significant, it is indicated with * ($p < 0,1$) or with ** ($p < 0,05$), and with ns if it is not significant.

Pehuajó	may-jun	jun-jul	jul-ago	ago-sep	sep-oct	oct-nov	nov-dic	dic-ene	ene-feb	feb-mar	mar-abr	abr-may
Modelo	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
Año	**	ns	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
Cultivo	ns	ns	ns	ns	**	**	ns	**	**	ns	**	ns
Topografía	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Mackenna												
Modelo	ns	ns	**	ns	**	ns	**	**	**	**	**	**
Año	-	-	**	-	**	-	**	**	**	**	**	**
Cultivo	-	-	ns	-	ns	-	**	**	*	**	**	**
Topografía	-	-	ns	-	*	-	**	**	ns	ns	**	*

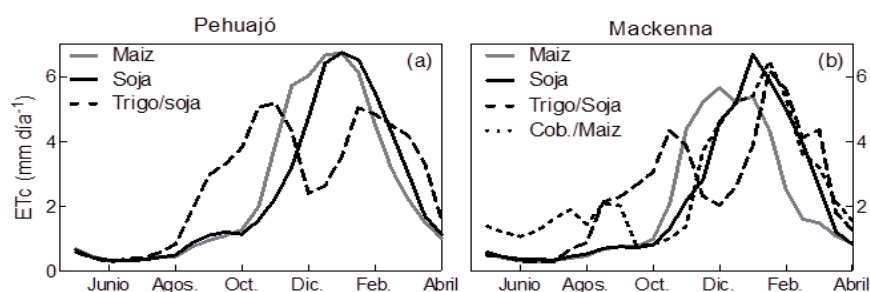


Figura 2. Tasas de Evapotranspiración del cultivo (ETc, mm día⁻¹) para los distintos cultivos de Pehuajó (a) y Mackenna (b). Los valores de ETc fueron calculados a través del producto de la ETP y el Kc derivado satelitalmente.

Figure 2. Crop evapotranspiration rates (ETc mm día⁻¹) for the different crops at Pehuajó (a) and Mackenna (b). The values of ETc were calculated as the product between ETP and the Kc derived by satellite.

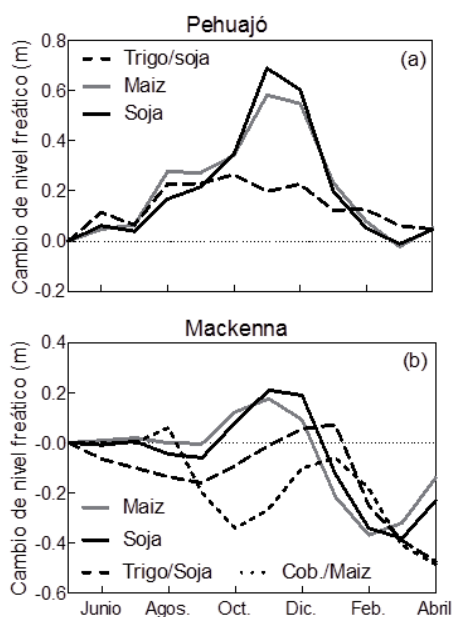


Figura 3. Variaciones promedio del nivel freático en Pehuajó (a) y Mackenna (b) para distintos cultivos. Se tomó como referencia la profundidad freática medida en Mayo y se consideraron las variaciones respecto a dicho nivel.
Figure 3. Mean variations of water-table levels at Pehuajó (a) and Mackenna (b) for different crops. The water-table depth registered in May was taken as a reference and the variations related to that level were computed.

Si bien en Pehuajó no se observó a la escala anual un efecto "cultivo", el mismo sí se manifestó cuando se analizaron períodos mensuales (Tabla 3). En general se observó que los períodos con efecto "cultivo" correspondieron a aquellos en que se dieron las máximas diferencias en ETc entre las distintas alternativas. Por ejemplo, durante la primavera el doble cultivo presentó mayores tasas de ETc que

los cultivos simples (Fig. 2a) lo cual determinó que los ascensos freáticos producidos durante este período sean menores (Fig. 3a). En Mackenna, los contrastes se observaron en los meses de primavera, verano y principios de otoño. Mientras que en verano los cultivos simples mostraron niveles ligeramente inferiores que los cultivos dobles, durante primavera y fines de otoño fueron los cultivos dobles los que presentaron niveles más profundos (Fig. 3b, Tabla 3).

Si bien a escala anual la topografía no afectó las variaciones de nivel freático en ninguno de los dos sitios, a la escala mensual sí se registró una fuerte influencia aunque sólo en el sitio de Mackenna (Tablas 2 y 3). En general se observó que los meses en los que se detectó influencia de la topografía correspondieron a períodos con excesos hídricos (Setiembre-Octubre; Marzo-Abril) o con fuertes déficits (Noviembre-Diciembre; Enero-Febrero). El efecto de la topografía se evidenció claramente cuando se analizaron los cambios de nivel en períodos más cortos (7 a 20 días), posiblemente debido a un menor tiempo de acción de los flujos horizontales de agua subterránea que operan ecualizando diferencias en el nivel absoluto de la napa. Se observó una estrecha asociación entre la magnitud del cambio de nivel y la profundidad freática, registrándose siempre los mayores cambios de nivel en las posiciones topográficas de bajos (Fig. 4). Cabe destacar que el signo de esta relación (i.e. positiva o negativa) cambió según se tratase de períodos secos con intensa descarga freática (e.g. 14 al 29 Enero 2011) donde los bajos presentaron los mayores descensos, o de períodos lluviosos que generaron recarga freática (e.g. 4 al 23 de Marzo 2010), donde también en los bajos se registraron los mayores ascensos (Fig. 4).

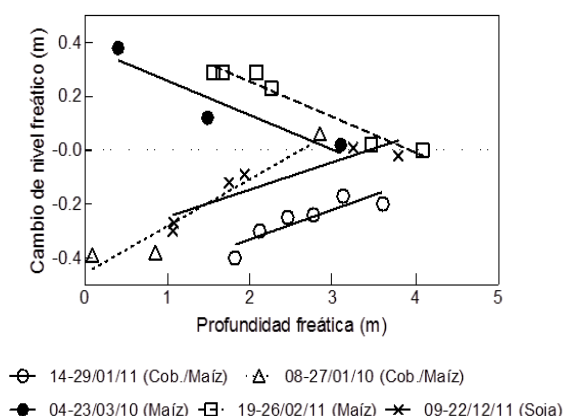


Figura 4. Relaciones entre la variación del nivel freático y la profundidad de la napa en el sitio de Mackenna. Las líneas muestran las rectas de ajuste de un modelo de regresión lineal. Se tomó como referencia la profundidad inicial de cada período analizado. En todos los casos, las pendientes de los modelos fueron significativamente distintas de cero ($p < 0,01$).

Figure 4. Relationships between water-table level changes and water-table depth in Mackenna. The lines represent the adjusted curves of a linear regression model. The water-table depth at the initial time was taken as a reference. In all cases, the slopes of the models were statistically different from zero ($p < 0,01$).

DISCUSIÓN

El análisis de los factores que regulan la dinámica freática mostró similitudes y diferencias entre los dos sitios bajo estudio. La mayor similitud fue el rol preponderante que ejerció el clima (efecto "año") sobre la variabilidad tanto anual como mensual en los niveles freáticos. Por otro lado, el efecto "cultivo" sólo se manifestó a la escala mensual en Pehuajó, mientras que en Mackenna también ejerció una influencia significativa a escala anual. Asimismo, el efecto de la topografía también difirió entre ambos sitios, siendo evidente su influencia a escala mensual en Mackenna.

El clima a través de las precipitaciones fue el principal factor de regulación de la dinámica freática. Esto por un lado, habilita la posibilidad de predecir con cierta certidumbre la profundidad del nivel freático ante distintos escenarios climáticos esperables, permitiendo anticipar acciones de manejo (Nosetto *et al.*, 2010). Por otro lado, resulta interesante notar que la precipitación anual de indiferencia, es decir la que no genera cambios de nivel freático, fue similar al valor medio de precipitación de cada sitio analizado (Fig. 1). Este patrón, observado también en otros

sitios de la región (Salvador, 2010), sugiere que la evapotranspiración de los sistemas agropecuarios es en el largo plazo similar a la precipitación media de cada sitio, resultando por lo tanto en balances neutros. Este comportamiento sugiere que el manejo de los sistemas agropecuarios pampeanos resulta altamente eficiente en el uso de las precipitaciones. Sin embargo, también hay que notar que en las partes más húmedas de la región y con napas más superficiales una alta proporción de la evapotranspiración se debe a evaporación directa desde el suelo y desde cuerpos de agua (Nosetto *et al.*, 2015).

La última campaña analizada en Pehuajó (2012-13) resultó la tercera más húmeda en 54 años (1265 mm), pero sorprendentemente no generó un aumento en los niveles freáticos (Fig. 1a). Esto puede explicarse por dos procesos simultáneos. Durante la campaña 2012-13 la superficie inundada en el sitio de Pehuajó alcanzó el 24% (Mercau *et al.*, enviado) debido a las altas precipitaciones ocurridas durante dicha campaña y la anterior (1153 mm). Este alto nivel de inundación determina una mayor conectividad de los cuerpos de agua lo que favorece la salida líquida superficial de agua de la región (Aragón *et al.*, 2010), proceso que en condiciones normales es despreciable (Kuppel *et al.*, 2015). Al mismo tiempo, la mayor superficie inundada incrementa la evaporación de tanque, la cual es en términos anuales significativamente mayor que la evapotranspiración de los cultivos de la región (Viglizzo *et al.*, 2009). Ambos procesos habrían aumentado las salidas líquidas y evaporativa de agua del sistema, atenuando el ascenso freático.

A pesar de las diferencias en evapotranspiración anual entre los distintos cultivos (principalmente cultivos dobles vs simples, Fig. 2), dichos contrastes sólo se manifestaron sobre los cambios anuales de nivel freático en el sitio de Mackenna (Fig. 3). En este caso, se observó el patrón esperable que es una mayor depresión en los niveles freáticos en los cultivos dobles respecto a los simples, debido a que el mayor déficit hídrico es compensado por consumo neto de agua subterránea (Florio *et al.*, 2014). La ausencia de este comportamiento en Pehuajó podría deberse a distintas cuestiones. Por un lado, el mayor nivel de precipitaciones determina que aún en los cultivos dobles el balance hídrico sea positivo, por lo tanto no habría consumo neto de napa por parte de los mismos. Por ejemplo, el balance anual $Pp - ETc$ para doble cultivo en Pehuajó es de 60 mm/año, mientras que en Mackenna es de -285 mm/año. Esto es corroborado por datos de rendimiento que no muestran respuesta a la profundidad del nivel freático en Pehuajó (*datos no mostrados*), pero sí en Mackenna (Florio *et al.*,

2014). De todos modos, el balance más positivo en los cultivos simples tampoco produjo, como sería esperable, un mayor ascenso freático en los mismos respecto a los cultivos dobles (Fig. 3a). Esto podría deberse, por un lado, a que los niveles freáticos más superficiales (Tabla 1) y una textura ligeramente más fina (Tabla 1) en Pehuajó habrían favorecido una mayor evaporación directa en los cultivos simples, compensando la menor transpiración respecto a los cultivos dobles (Nosetto *et al.*, 2015). Esto es corroborado por simulaciones de tasas de ascenso capilar en condiciones de equilibrio realizadas con el modelo UPFLOW (Raes & Deproost 2003), el cual sugiere tasas notoriamente superiores en Pehuajó (1,7 vs 0,3 mm/día) cuando se considera una demanda atmosférica de 5 mm/día, una situación de suelo desnudo y las condiciones de textura y profundidad media de napa observada en bajos en ambos sitios (Tabla 1).

Finalmente, flujos horizontales de agua subterránea podrían compensar de manera relativamente rápida (< 1 año) desniveles freáticos generados en cortas distancias (Nosetto *et al.*, 2015). Dado que las conductividades hidráulicas saturadas son altas y similares en ambos sitios (Tabla 1), es probable que los flujos horizontales subterráneos se hayan visto favorecidos en Pehuajó respecto a Mackenna por el menor tamaño de los lotes y su diseño irregular, como lo indica la relación perímetro/área de los mismos (Tabla 1), lo que aumentaría los gradientes hidráulicos.

La topografía sólo afectó la dinámica freática a la escala mensual y sólo en Mackenna, observándose mayores ascensos y descensos en los bajos (Fig. 4). Los descensos se corresponderían con descarga evapotranspirativa por parte de los cultivos y/o evaporación directa, dado que ocurren en períodos de déficits hídricos, en los cuales la napa ayudaría a suplirlos (Ayars *et al.*, 2006). Por otro lado, los mayores ascensos corresponderían a eventos de recarga de mayor magnitud en los bajos, respecto a medias lomas y lomas, debido posiblemente a un menor espesor de la zona no saturada y a un eventual ingreso extra de agua debido al escurrimiento superficial (Nosetto *et al.*, 2013). En Pehuajó estos efectos no se habrían manifestado debido a la ausencia de consumo neto de napa por parte de los cultivos y la presencia de pendientes locales notoriamente menores que Mackenna (Tabla 1), lo que habría limitado el escurrimiento superficial.

En este trabajo encontramos que la dinámica freática estuvo fuertemente regulada por las condiciones climáticas.

Sin embargo, también se identificó, aunque de menor magnitud, un efecto del "cultivo" a escala mensual en ambos sitios y a escala anual sólo en Mackenna. De esta manera, se abre la posibilidad de cierto "manejo" interanual y/o estacional del nivel freático a partir de las elecciones de siembra, disminuyendo así algunos riesgos en la operación de la agricultura. Por ejemplo, ante una eventual situación de niveles freáticos muy superficiales, la elección del doble cultivo trigo/soja o la incorporación de cultivos de cobertura podría ayudar a deprimir los niveles freáticos y disminuir de este modo los daños del anegamiento.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la ANPCyT (PRH 27 PICT 2008-00187, Argentina) y por el International Development Research Center (IDRC 106601-001, Canadá). Los autores también agradecen al personal de los establecimientos El Consuelo (Mackenna) y Magdala (Pehuajó) por su compromiso con este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- Alconada Magliano, MM; A Bussoni; R Rosa & JJ Carrillo Rivera. 2009. El bio-drenaje para el control del exceso hídrico en Pampa Arenosa, Buenos Aires, Argentina. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM 68: 50-72.
- Allen, RG; LS Pereira; D Raes & MD Smith. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Rome, FAO.
- Aragón, RM; EG Jobbágy & EF Viglizzo. 2010. Surface and groundwater dynamics in the sedimentary plains of the Western Pampas (Argentina). *Ecohydrology* 4: 433-447.
- Ayars, JE; EW Christen; RW Soppe & WS Meyer. 2006. The resource potential of in-situ shallow ground water use in irrigated agriculture: a review. *Irrigation Science* 24: 147-160.
- Degiovanni, S. 2005. Geomorfología Regional. Aguas superficiales y subterráneas en el sur de Córdoba: Una perspectiva geoambiental. M Blarasin, S Degiovanni, A Cabrera and M Villegas. Río Cuarto, Universidad Nacional de Río Cuarto: 19-30.
- Dingman, SL. 1993. Physical hydrology. New Jersey, Prentice Hall.
- Florio, EL; JL Mercu; EG Jobbágy & MD Nosetto. 2014. Interactive effects of water-table depth, rainfall variation, and sowing date on maize production in the Western Pampas. *Agric. Water Manage.* 146: 75-83.
- Freezem, RA & JA Cherry. 1979. Groundwater, Prentice Hall, Inc.
- Heuperman, A. 1999. Hydraulic gradient reversal by trees in shallow water table areas and repercussions for the sustainability of tree-growing systems. *Agric. Water Manage.* 39: 153-167.
- INTA 1989. Mapa de suelos de la provincia de Buenos Aires - Escala 1:500.000. Buenos Aires, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Jobbágy, EG; MD Nosetto; C Santoni & G Baldi. 2008. El desafío ecohidrológico de las transiciones entre sistemas leñosos y herbáceos en la llanura Chaco-Pampeana. *Ecología Austral* 18: 305-322.

- Kim, JH & RB Jackson. 2012. A Global Analysis of Groundwater Recharge for Vegetation, Climate, and Soils. *Vadose Zone Journal* 11(1): DOI 10.2136/vzj2011.0021RA.
- Kuppel, S; J Houspanossian; MD Nosetto & EG Jobbágy. 2015. What does it take to flood the Pampas? Lessons from a decade of strong hydrological fluctuations. *Water Resour. Res.* 51: doi:10.1002/2015WR016966.
- Lavado, RS & MA Taboada. 1988. Water, salt and sodium dynamics in a natraquoll in Argentina. *CATENA* 15: 577-594.
- Magliano, PN, RJ Fernández, JL Mercáu & EG Jobbágy. 2015. Precipitation event distribution in Central Argentina: spatial and temporal patterns. *Ecohydrology* 8(1): 94-104.
- Menéndez, NA; N Badano; E Lecertua; F Re & M Re 2012. Evaluación de las Inundaciones y las Obras de Drenaje en la Cuenca del Salado (Prov. Buenos Aires) mediante Modelación Numérica. Proyecto LHA 331. Informe LHA 01-331-12, Instituto Nacional del Agua. Subsecretaría de Recursos Hídricos. Secretaría de Obras Públicas. República Argentina.: 323.
- Mercáu, J; MD Nosetto; F Bert; R Gimenez & EG Jobbágy. enviado. Shallow groundwater dynamics in the Pampas: Climate, landscape and crop choice effects. *Agric. Water Manage.*
- New, M; D Lister; M Hulme & I Makin. 2002. A high-resolution data set of surface climate over global land areas. *Climate Res.* 21: 1-25.
- Nosetto, MD, AM Acosta, DH Jayawickreme, SI Ballesteros, RB Jackson & EG Jobbágy. 2013. Land-use and topography shape soil and groundwater salinity in central Argentina. *Agric. Water Manage.* 129: 120-129.
- Nosetto, MD; EG Jobbágy; AB Brizuela & RB Jackson. 2012. The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 154: 2-11.
- Nosetto, MD; EG Jobbágy; RB Jackson & G Sznaider. 2009. Reciprocal influence between crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field Crop Res* 113: 138-148.
- Nosetto, MD; EG Jobbágy & J Mercáu. 2010. Ambientación y aplicación variable de insumos en áreas con influencia freática. *AAPRESID. Revista Técnica Especial. Agricultura de precisión y manejo por ambientes*: 15-20.
- Nosetto, MD; R Paez; SI Ballesteros & EG Jobbágy. 2015. Higher water-table levels and flooding risk under grain vs. livestock production systems in the subhumid plains of the Pampas. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 206: 60-70.
- Raes, D & P Deproost. 2003. Model to assess water movement from a shallow water table to the root zone. *Agric. Water Manage.* 62: 79-91.
- Salvador, VS. 2010. Evaluación de la dinámica hidrológica de la pradera pampeana en respuesta a cambios en el uso de la tierra. Master, Universidad Nacional de Mar del Plata.
- Soriano, A; RJC Leon; OE Sala; RS Lavado; VA Deregibus; M Cahuepe; OA Scaglia; CA Velázquez & JH Lemcoff. 1991. Río de la Plata Grasslands. *Natural Grasslands: Introduction and Western Hemisphere. Ecosystems of the World 8A*. RT Coupland. Amsterdam, Elsevier: 367-407.
- Tricart, JL. 1973. Geomorfología de la Pampa Deprimida. Base para los estudios edafológicos y agronómicos. Plan mapa de suelos de la región pampeana. Buenos Aires, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, INTA. Colección Científica No. XII.
- Viglizzo, EF; EG Jobbágy; LV Carreño; FC Frank; RM Aragón; L De Oro & VS Salvador. 2009. The dynamics of cultivation and floods in arable lands of central Argentina. *Hydrology and Earth System Sciences* 13: 491-502.
- Ward, PR; FX Dunin & SF Micin. 2002. Water use and root growth by annual and perennial pastures and subsequent crops in a phase rotation. *Agric. Water Manage.* 53: 83-97.